

NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG BẢO VỆ CỐT THÉP CỦA BÊ TÔNG CƯỜNG ĐỘ CAO SỬ DỤNG HÀM LƯỢNG TRO BAY LỚN TIẾP XÚC VỚI NƯỚC BIỂN

Bùi Thị Thanh Huyền^a, Tống Tôn Kiên^{a,*}, Lê Mạnh Cường^a,

Nguyễn Tuấn Minh^a, Nguyễn Mạnh Phát^a

^aKhoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 11/10/2021, Sửa xong 10/11/2021, Chấp nhận đăng 12/11/2021

Tóm tắt

Bê tông cường độ cao (HSC) có hàm lượng tro bay lớn không những đáp ứng được yêu cầu cao về cường độ và độ bền lâu trong môi trường xâm thực biển mà còn góp phần phát triển bền vững trong ngành xây dựng, giảm thiểu lượng lớn tro bay nhiệt điện đang tồn chứa gây ô nhiễm môi trường. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu đánh giá khả năng bảo vệ cốt thép của HSC sử dụng tới 50% tro bay thay thế xi măng. Hai loại tro bay đốt than theo công nghệ tầng sôi tuần hoàn (CFB), và công nghệ than phun (PC) được so sánh trên các mẫu bê tông cốt thép làm việc ở các vùng ngập nước biển nhân tạo (NBNT) khác nhau. Các kết quả đo điện thế ăn mòn theo thời gian; phổ tổng trở điện hóa EIS; đường cong phân cực; áp dòng cưỡng bức theo tiêu chuẩn hiệu chỉnh NT BUILD 356 và quan sát trực quan cho thấy mẫu bê tông sử dụng hàm lượng tro bay lớn có khả năng bảo vệ cốt thép tốt hơn nhiều so với bê tông không tro bay. Hơn nữa, tro bay PC làm tăng khả năng bảo vệ ăn mòn cốt thép lớn hơn so với tro bay CFB ở cả ba chế độ ngập nước.

Từ khoá: bê tông cường độ cao - HSC; tro bay - FA; bê tông hàm lượng tro bay cao - HVFAC; tro bay đốt tầng sôi tuần hoàn - CFB; tro bay đốt than phun - PC; nước biển nhân tạo - NBNT; phổ tổng trở điện hóa - EIS.

EVALUATION OF STEEL CORROSION PROTECTION OF HIGH STRENGTH CONCRETE USED HIGH FLY ASH CONTENT IN THE SEAWATER

Abstract

High strength concrete (HSC) with high-volume fly ash is not only meets the high requirements of strength and long-term durability in the aggressive marine environment but also contribute to sustainable development in the construction industry, and reduce a large amount of thermal fly ash (FA) that causes a polluted environment. This paper presents the research results of the evaluation of the rebar protection ability of the HSC used up to 50% FA to cement replacement. Two types of FA from the circulating fluidized bed combustion technology (CFB), and pulverized coal boiler technology (PC) were compared with the control reinforced concrete working in the different immersion zone in artificial seawater (NBNT). The results of the dependence of the corrosion potential on time; electrochemical impedance spectroscopy (EIS); polarization curve; impressed current techniques for accelerating reinforcement corrosion according to modified NT BUILD 356 standard and naked eye observation show that the concrete samples using high fly ash content have much better protection performance to reinforcement corrosion than that of the control concrete. Furthermore, PC fly ash gives greater reinforcement corrosion protection than CFB fly ash in all three submergence regimes.

Keywords: high strength concrete - HSC; fly ash - FA; high volume fly ash concrete- HVFAC; circulating fluidized bed combustion - CFB; pulverized coal combustion (PC) - PC; artificial seawater; electrochemical impedance spectroscopy - EIS.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(6V\)-09](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(6V)-09) © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: kientt@nuce.edu.vn (Kiên, T. T.)

1. Giới thiệu

Trong môi trường biển, các công trình xây dựng và hạ tầng kỹ thuật thường bị ăn mòn và phá hủy nhanh chóng. Theo tài liệu khảo sát [1, 2], các công trình xây dựng và hạ tầng kỹ thuật sử dụng bê tông cốt thép ở ven biển, trên các đảo thường bị ăn mòn và phá hủy nghiêm trọng sau 10 - 15 - 20 năm. Do đó việc sửa chữa và bảo vệ đòi hỏi chi phí lớn, chiếm khoảng 40-70% giá thành xây dựng [3]. Mức độ ăn mòn các kết cấu phụ thuộc vào thành phần của nước biển (độ mặn), điều kiện khí hậu (như nhiệt độ, độ ẩm), hoạt động của sóng, hướng gió và “vùng biển” (như vùng ngập hoàn toàn, vùng thủy triều, vùng sóng tấp) mà bê tông tiếp xúc [4]. Môi trường biển Việt Nam có đặc thù khí hậu nóng ẩm, mưa bão nhiều cho nên sự ăn mòn kết cấu bê tông cốt thép còn xảy ra mạnh hơn. Một trong những dạng hư hỏng phổ biến đối với bê tông cốt thép trong môi trường biển là sự ăn mòn của cốt thép do sự xâm nhập của các ion clorua. Chính vì vậy, việc nghiên cứu chế tạo các loại bê tông có chất lượng cao, bền vững với môi trường biển và thân thiện môi trường là xu hướng tất yếu; đáp ứng chiến lược phát triển kinh tế biển đã và đang được Đảng và Nhà nước quan tâm đầu tư.

Các biện pháp thường được sử dụng để tăng khả năng chống lại sự xâm nhập của ion clorua vào bê tông bao gồm giảm tỷ lệ nước/xi măng và tăng cường sử dụng các vật liệu thay thế xi măng như tro bay, silica fume, metakaolin và các puzzolan và xỉ lò cao hạt hóa nghiền mịn [4–6]. Trong khi đó, lượng tro bay nhiệt điện tại Việt Nam phát sinh ngày càng nhiều và đang gây ô nhiễm môi trường nghiêm trọng. Vì vậy, nếu sử dụng tro bay với tỷ lệ hợp lý trong bê tông sẽ giúp cải thiện các chỉ tiêu về cường độ, độ bền, có tác dụng ngăn cản tác nhân sunfat và ion clo, làm giảm nhiệt thủy hóa, làm tăng độ đặc chắc và ức chế phản ứng kiềm cốt liệu, ... cho kết cấu bê tông và giảm ăn mòn cốt thép trong bê tông cốt thép [4–11]. Ngoài ra, việc sử dụng tro bay vừa góp phần giảm thiểu lượng phế thải nhiệt điện tồn chứa, vừa giúp tiết kiệm đáng kể chi phí sản xuất bê tông cũng như góp phần làm giảm lượng phát thải khí CO₂ trong xây dựng [10, 12, 13].

Tro bay đã được nhiều nghiên cứu sử dụng trong chế tạo bê tông thường và bê tông cường độ cao (HSC) [13–16]. Tuy nhiên tro bay thường được sử dụng với hàm lượng thấp ($\leq 40\%$) [6, 9–11, 14] hoặc bê tông cường độ trung bình và thấp [14–17]. Tại Việt Nam, Nam [15] đã nghiên cứu bê tông hàm lượng tro bay lớn sử dụng tro bay sau tuyển của nhà máy nhiệt điện Phả Lại tới 50% khối lượng chất kết dính (CKD) trong chế tạo bê tông khối lớn cho đập trọng lực, với cường độ chịu nén của bê tông chỉ đạt khoảng 15-20 MPa. Phạm và cs. [13] đã sử dụng 35% tro bay đã tuyển kết hợp với 6% silicafume để chế tạo HSC đạt cường độ chịu nén 80 MPa cho kết cấu công trình biển. Kết quả nghiên cứu của Nguyen và cs. [17] cho thấy tro bay có tác dụng làm giảm nguy cơ gây ăn mòn cốt thép của bê tông nhờ vào việc đánh giá điện thế mạch hở của các thanh thép sau 300 ngày ngâm trong dung dịch NaCl 5%. Một số nghiên cứu cũng cho rằng khi tăng lượng dùng tro bay thay thế xi măng trong bê tông có thể làm giảm rõ rệt sự xâm nhập của ion clorua, và sự ăn mòn cốt thép trong bê tông [7, 17]. Tuy nhiên chưa có nhiều nghiên cứu về khả năng bảo vệ cốt thép khỏi ăn mòn của bê tông cường độ cao sử dụng hàm lượng tro bay $\geq 50\%$ (HS-HVFAC).

Xuất phát từ những thực tế trên, nghiên cứu này tập trung đánh giá về độ bền ăn mòn của cốt thép trong bê tông có cường độ cao (≥ 60 MPa) sử dụng tới 50% tro bay từ hai công nghệ đốt than khác nhau (đốt tầng sôi tuần hoàn-CFB và đốt than phun-PC) của các nhà máy nhiệt điện tại Quảng Ninh. Các mẫu bê tông cốt thép được thí nghiệm mô phỏng ở các vùng ngập nước biển nhân tạo (NBNT) khác nhau. Để đánh giá khả năng chống ăn mòn cốt thép trong bê tông, các phương pháp đo điện thế ăn mòn theo thời gian; phổ tổng trở điện hóa EIS; đường cong phân cực; áp dòng cường bức theo tiêu chuẩn NT BUILD 356 (có hiệu chỉnh) và quan sát trực quan được thực hiện trong nghiên cứu. Kết quả nghiên cứu không những khẳng định khả năng bảo vệ ăn mòn cốt thép của bê tông cường độ cao sử dụng tro bay hàm lượng lớn, mà còn góp phần thúc đẩy ứng dụng phổ biến loại bê tông này và tăng

cường phát triển xây dựng bền vững.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu sử dụng

Xi măng sử dụng trong nghiên cứu là xi măng poóc lăng thông thường PC50 Cẩm Phả (XM). Kết quả tính chất kỹ thuật của xi măng đạt mức PC50 (Bảng 1).

Bảng 1. Tính chất cơ lý của xi măng PC50 Cẩm Phả

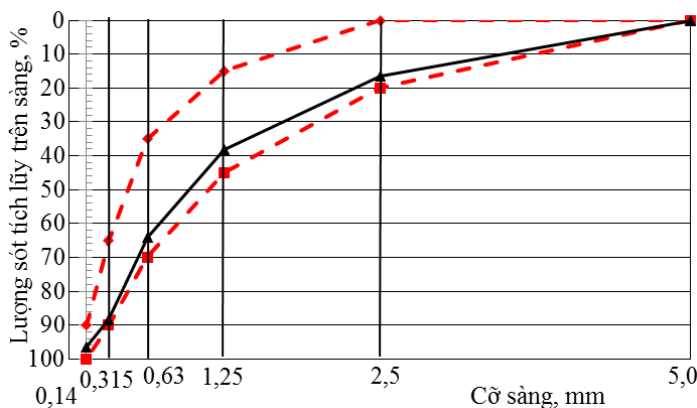
STT	Chỉ tiêu	Phương pháp thí nghiệm	Đơn vị	Kết quả
1	Khối lượng riêng	TCVN 4030:2003 [18]	g/cm ³	3,06
2	Độ mịn lọt sàng 90 µm)	TCVN 4030:2003 [18]	%	0,8
3	Lượng nước tiêu chuẩn	TCVN 6017:2015 [19]	%	29,5
4	Thời gian đông kết: - Bắt đầu - Kết thúc	TCVN 6017:2015 [19]	Phút Phút	85 168
5	Cường độ nén: - 3 ngày - 28 ngày	TCVN 6016:2011 [20]	MPa MPa	35,8 57,6

Cốt liệu nhỏ được sử dụng là cát tự nhiên hạt thô và cốt liệu lớn được sử dụng là đá dăm $D_{\max} = 10$ mm. Đá dăm $D_{\max} = 10$ mm được sử dụng nhằm tăng độ ổn định và cường độ hỗn hợp cốt liệu lớn. Tính chất cơ lý và thành phần hạt của cốt liệu được xác định theo TCVN 7572:2006 [21], kết quả thu được trình bày tại Bảng 2 và Hình 1. Có thể thấy rằng cát thô và đá dăm sử dụng đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 7570:2006 [22].

Bảng 2. Tính chất cơ lý của cát thô và đá dăm $D_{\max} = 10$ mm

STT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Cát thô	Đá dăm $D_{\max} = 10$ mm
1	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,66	2,75
2	Khối lượng thể tích ở trạng thái khô	g/cm ³	2,58	2,70
3	Khối lượng thể tích ở trạng thái bão hòa	g/cm ³	2,61	2,72
4	Độ hút nước	%	1,1	0,6
5	Khối lượng thể tích đồ đông	g/cm ³	1,55	1,48
6	Hàm lượng bụi bùn sét	%	1,8	2,36
7	Hàm lượng hạt > 5 mm	%	1,67	-
8	Mô đun độ lớn	-	3,04	-
9	Độ nén đập	%	-	3,9
10	Hàm lượng hạt thai dẹt	%	-	4,6

Tro bay sử dụng được lấy trực tiếp từ xi lô chứa của hệ thống lọc bụi của Nhà máy Nhiệt điện Quảng Ninh (QN) và Nhà máy Nhiệt điện Cẩm Phả (CP) tại tỉnh Quảng Ninh. Nhà máy nhiệt điện



Hình 1. Thành phần hạt của cát thô sử dụng

Quảng Ninh sử dụng công nghệ đốt than phun (PC), còn nhà máy nhiệt điện Cẩm Phả sử dụng công nghệ đốt than tầng sôi tuần hoàn (CFB). Kết quả phân tích thành phần hóa của hai mẫu tro bay được trình bày tại Bảng 3. Hàm lượng sót trên sàng 45 μm tương ứng của tro bay PC và CFB là 21,4% và 20,9%.

Bảng 3. Thành phần hóa học của các mẫu tro bay sử dụng

Loại tro bay	Thành phần hóa (%)										
	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	SO_3	BaO	P_2O_5	Khác	MKN
Tro bay CFB	24,8	49,3	6,3	6,4	1,8	9,6	0,7	0,2	0,2	0,7	6,81
Tro bay PC	24,8	51,8	5,9	2,1	3,3	9,6	1,7	0,2	0,5	0,1	6,58

Qua Bảng 3 cho thấy cả hai loại tro bay PC và CFB đều có hàm lượng CaO nhỏ hơn 10% nên các mẫu tro bay sử dụng đều thuộc tro bay axit (loại F) theo TCVN 10302:2014 [23]. Tổng hàm lượng ôxít $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ của tro bay CFB và PC tương ứng là 83,8% và 86,2%; hàm lượng mất khi nung (MKN) là 6,81% và 6,58% đều lớn hơn 6% nên không dùng được làm phụ gia cho xi măng theo ASTM C618 [24] và TCVN 10302:2014. Tuy nhiên, do cả hai loại than sử dụng đều có nguồn gốc từ than antraxit nên cả hai loại tro bay đều có thể làm phụ gia khoáng dùng cho chế tạo sản phẩm và cấu kiện bê tông, bê tông cốt thép làm việc trong điều kiện đặc biệt [23].

Phụ gia được sử dụng là phụ gia giảm nước cao và rắn nhanh có gốc Poly cacboxylat biến tính, có khối lượng riêng 1,12 kg/lít và độ pH bằng 6,5. Nước trộn và bảo dưỡng bê tông sử dụng là nước máy sinh hoạt.

2.2. Chuẩn bị mẫu bê tông cốt thép

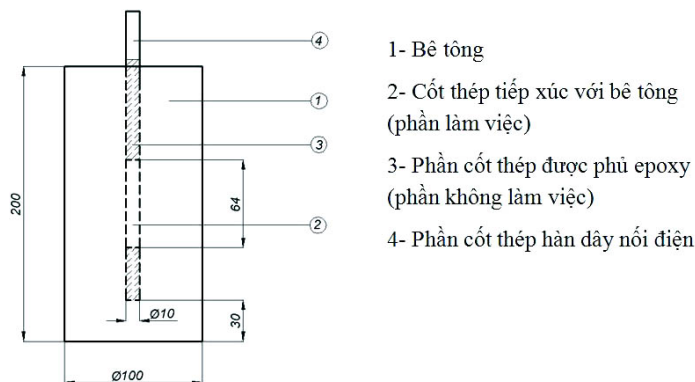
Nghiên cứu được thực hiện trên các loại bê tông bao gồm: bê tông có sử dụng 50% tro bay CFB (kí hiệu là CP); 50% tro bay PC (kí hiệu là QN) và mẫu bê tông đối chứng không sử dụng tro bay (kí hiệu là ĐC). Thành phần các nguyên liệu và tính chất của bê tông được trình bày trên Bảng 4. Độ sụt của hỗn hợp bê tông được xác định theo TCVN 3106:1993 [25]. Mẫu bê tông được chế tạo và bảo dưỡng trong khuôn 1 ngày, sau đó tháo khuôn và bảo dưỡng mẫu theo TCVN 3105:1993 đến tuổi thí nghiệm. Cường độ chịu nén của bê tông được xác định trên các tổ mẫu gồm 03 mẫu lập phương có

kích thước tiêu chuẩn 150×150×150 mm ở tuổi 7, 28 và 91 ngày theo TCVN 3118:1993 [26]. Kết quả cường độ nén của bê tông CP thấp hơn hẳn so với mẫu bê tông ĐC và QN là do lượng nước trộn và lượng phụ gia hóa dẻo lớn nhằm đảm bảo độ sụt của hỗn hợp bê tông tương đương nhau và đạt 20 ± 2 cm.

Bảng 4. Thành phần vật liệu và tính chất của hỗn hợp bê tông nghiên cứu

Thành phần nguyên liệu	Loại bê tông		
	ĐC	QN	CP
Xi măng (kg)	560	280	280
Tro bay (kg)	0	280	280
Đá (kg)	950	950	950
Cát (kg)	879	879	879
Nước (lít)	141	141	179
Phụ gia (lít)	4,2	4,2	6,3
Tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông			
Độ sụt	19,0	20,0	21,0
Cường độ nén: 7 ngày	79,5	61,01	51,8
28 ngày	82,4	81,6	60,4
91 ngày	89,8	92,9	64,7

Để thí nghiệm khả năng ăn mòn cốt thép trong bê tông, mẫu bê tông cốt thép sử dụng có dạng hình trụ đường kính $\Phi 100$ mm và chiều cao 200 mm. Cốt thép sử dụng là thép vằn $\Phi 10$ mm, tổng chiều dài 250 mm; trong đó chiều dài cốt thép trần (phần nghiên cứu) tiếp xúc với bê tông là 64 mm. Việc sử dụng thanh thép vằn để tương đương với ứng xử của các thanh cốt thép chịu lực trong bê tông. Cốt thép được xử lý bề mặt (sạch dầu mỡ) trước khi đúc bê tông. Phần bề mặt không làm việc được phủ epoxy, một đầu có hàn với dây dẫn điện với cốt thép. Cốt thép trong bê tông được bố trí như Hình 2. Các mẫu bê tông sau khi đúc 1 ngày được tháo khuôn và bảo dưỡng 28 ngày trong môi trường ngập nước trước khi đem thử nghiệm ăn mòn.



Hình 2. Bản vẽ bố trí cốt thép trong mẫu bê tông

2.3. Chế độ thí nghiệm

Nghiên cứu ăn mòn cốt thép trong bê tông được thực hiện trong môi trường nước biển nhân tạo (NBNT). NBNT được chế tạo từ các muối hòa tan trong nước cất theo hàm lượng quy định của tiêu chuẩn ASTM D114-98 (2021) [27]. Để mô phỏng cho các vùng ăn mòn khác nhau trong môi trường biển, các mẫu bê tông được nghiên cứu với ba chế độ ngập nước như sau:

- Ngập hoàn toàn trong NBNT (I) để mô phỏng vùng ngập hoàn toàn trong nước biển.
- Ngập mún nước 5 cm trong NBNT (II) để mô phỏng vùng mún nước.
- Ngập chu kỳ 20h khô và 4h ướt trong NBNT (III) để mô phỏng cho vùng thủy triều lên xuống.

Chế độ chu kỳ khô- ướt được thực hiện bởi sử dụng 2 máy bơm hẹn giờ để bơm NBNT vào (với chu kỳ ướt, giữ bê tông ướt trong 4h) và bơm NBNT ra (với chu kỳ khô, giữ bê tông khô trong 20h). Các kết quả thí nghiệm được đo khi mẫu bê tông ở giai đoạn 4h ướt.

Mỗi chế độ và điều kiện thử nghiệm đều được thực hiện trên bộ 01 tổ mẫu gồm 03 mẫu bê tông ĐC, QN, CP và được ký hiệu như trên Bảng 5.

Bảng 5. Ký hiệu mẫu bê tông theo cấp phối theo chế độ ngập nước

Loại bê tông	Ngập hoàn toàn	Ngập mún nước	Ngập chu kỳ
ĐC	ĐC-I	ĐC-II	ĐC-III
QN	QN-I	QN-II	QN-III
CP	CP-I	CP-II	CP-III

Trong thời gian thí nghiệm, các dung dịch được thay mới định kỳ để tránh bị kiềm hoá. Ở thời gian đầu, pH của dung dịch thay đổi nhiều, dung dịch phải được thay mới thường xuyên (khoảng 2 tuần/lần). Ở giai đoạn sau, khi pH của dung dịch ít thay đổi, có thể kéo dài thời gian thay dung dịch tới 01 tháng/lần hoặc hơn.

2.4. Phương pháp nghiên cứu

a. Các phương pháp điện hóa

- Đo điện thế ăn mòn theo thời gian

Để đánh giá khả năng cốt thép bị ăn mòn tại thời điểm kiểm tra, phương pháp đo điện thế ăn mòn theo thời gian được sử dụng dựa vào điện thế ăn mòn của cốt thép theo tiêu chuẩn TCVN 9348:2012 [28]. Phương pháp này chỉ cho biết khả năng ăn mòn về mặt nhiệt động dựa vào giá trị điện thế ăn mòn (Bảng 6). Từ đó đánh giá được xác suất xảy ra ăn mòn cốt thép trong bê tông. Phương pháp này không cho biết tốc độ ăn mòn. Điện thế ăn mòn của cốt thép trong các mẫu bê tông ở cả ba chế độ ngập nước trong NBNT tại các thời gian ngâm mẫu khác nhau được đo (so với điện cực so sánh Ag/AgCl) bằng đồng hồ vạn năng Kyoritsu 1009.



Hình 3. Ảnh chụp hệ bơm hẹn giờ tự động và mẫu bê tông ngập chu kỳ

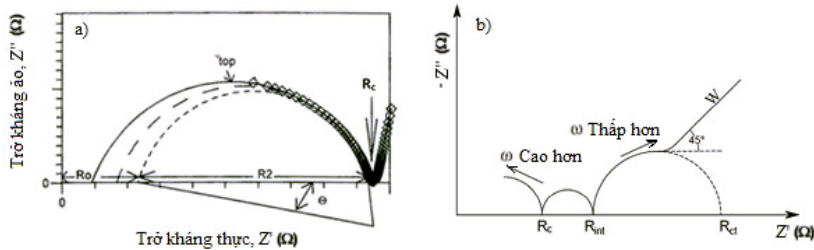
Bảng 6. Điện thế của cốt thép và khả năng cốt thép bị ăn mòn [28]

Điện thế của cốt thép so với điện cực bạc clorua bão hòa ($\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{Cl}^-$), mV	Khả năng cốt thép bị ăn mòn tại thời điểm kiểm tra
> -106	Cốt thép chưa bị ăn mòn (xác suất trên 90%)
$-256 \div -106$	Khả năng cốt thép bị ăn mòn không chắc chắn
< -256	Cốt thép đã bị ăn mòn (xác suất trên 90%)

- Phổ tổng trở điện hóa EIS

Để đánh giá được mức độ ăn mòn của cốt thép, nghiên cứu sử dụng phương pháp phổ tổng trở điện hóa (EIS) và đường cong phân cực. Các phương pháp này được đo trên hệ thiết bị điện hóa Autolab PGSTAT 302N với phần mềm FRA và LPR. Hệ điện hoá gồm 3 điện cực: điện cực nghiên cứu là cốt thép trong bê tông; điện cực so sánh là điện cực bạc clorua bão hòa (Ag/AgCl) có điện thế bằng +0,195 V so với điện cực hydro tiêu chuẩn (SHE) và điện cực phụ là điện cực lưới titan phủ hỗn hợp oxit.

EIS của cốt thép trong bê tông được đo trong NBNT ở các chế độ ngập nước khác nhau với tần số từ 100 kHz đến 10 mHz khi áp một biên độ điện thế xoay chiều 10 mV tại điện thế ăn mòn. Từ phổ tổng trở đo được, phù hợp với phổ Nyquist (Hình 4), xác định được điện trở của bê tông [29, 30]. Hình 4 là sơ đồ phổ Nyquist của cốt thép trong bê tông với hai dạng khác nhau. Phổ có 2 cung như sơ đồ dạng phổ Hình 4(a), hoặc có 3 cung như sơ đồ Hình 4(b). Trong đó, điểm cắt trục hoành của cung đầu tiên là điện trở của bê tông, R_c [29, 30].



Hình 4. Sơ đồ phổ Nyquist của cốt thép trong bê tông [29, 30]

Điện trở suất của bê tông (ρ) được tính phụ thuộc vào điện trở của bê tông theo công thức (1) [31]:

$$\rho = R_c S / L \quad (1)$$

trong đó: R_c là điện trở của bê tông; S là tiết diện mẫu bê tông đường kính $\Phi 10$ cm, ($S = 78,5 \text{ cm}^2$); L là chiều dài mẫu bê tông hình trụ, ($L = 20$ cm).

Dựa vào khoảng điện trở suất của bê tông sẽ đánh giá được mức độ ăn mòn của cốt thép trong bê tông (Bảng 7) [32].

- Phương pháp thế động

Đường cong phân cực của cốt thép trong bê tông được đo bằng phương pháp thế động trong khoảng quét thế từ -300 mV đến $+2000$ mV so với điện thế ăn mòn E_c với tốc độ quét là 5 mV/s . Các thông số của quá trình ăn mòn cốt thép (i_{corr} , E_{corr}) được xác định bằng phương pháp ngoại suy Tafel

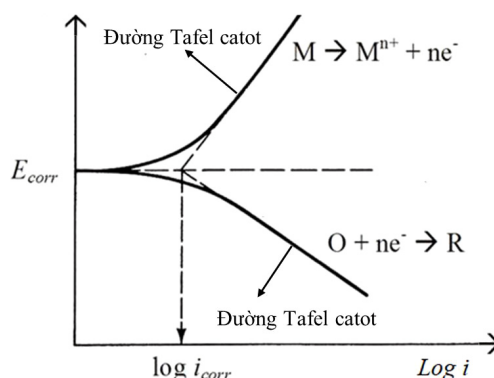
Bảng 7. Khoảng điện trở suất của bê tông và khoảng dòng ăn mòn cốt thép tương ứng với mức độ ăn mòn cốt thép [32]

Điện trở suất của bê tông, ρ (k Ω .cm)	Khoảng dòng ăn mòn và độ thâm nhập		Mức độ ăn mòn cốt thép
	i_{corr} (μ A/cm ²)	P (mm/năm)	
> 100	$\leq 0,1$	$\leq 0,001$	Không đáng kể
50 ÷ 100	0,1 ÷ 0,5	0,001 ÷ 0,005	Thấp
10 ÷ 50	0,5 ÷ 1	0,005 ÷ 0,01	Trung bình
< 10	> 1	> 0,010	Cao

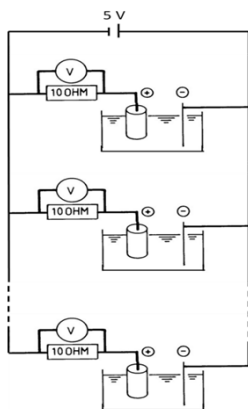
từ đường cong phân cực (nguyên tắc như Hình 5). Ngoài ra, khi nhập các dữ liệu về khối lượng riêng và khối lượng phân tử của kim loại, còn xác định được độ ăn mòn dựa vào độ thâm nhập P (mm/năm), điện trở phân cực R_p . Dựa vào giá trị dòng ăn mòn i_{corr} hoặc độ thâm nhập P thu được để đánh giá mức độ ăn mòn cốt thép theo Bảng 7 [32].

- Phương pháp NT BUILD 356 hiệu chỉnh

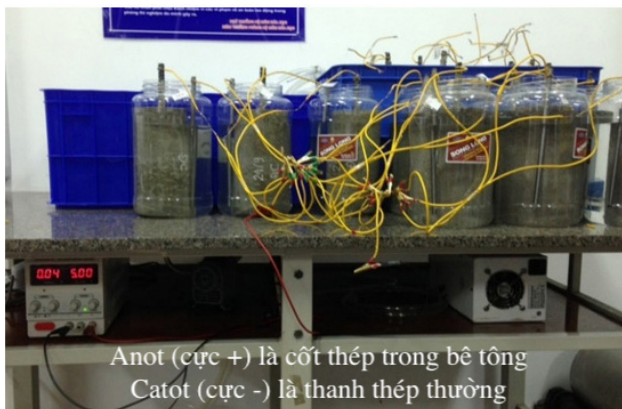
Để đánh giá độ bền ăn mòn của bê tông cốt thép dưới điều kiện áp dòng cưỡng bức, nghiên cứu này áp dụng theo tiêu chuẩn NT BUILD 356 có hiệu chỉnh [33, 34]. Các mẫu bê tông ở hai chế độ ngập hoàn toàn và ngập mớn nước trong môi trường NBNT được nghiên cứu đánh giá. Thử nghiệm được tiến hành với bộ gồm 03 mẫu cho mỗi loại bê tông ở cùng một chế độ ngập nước. Như vậy 09 mẫu bê tông tương ứng với 3 loại bê tông ĐC, QN và CP được mắc song song với nhau (Hình 6) để đảm bảo điện áp trên mỗi mẫu bê tông cốt thép đều là 5V.



Hình 5. Phương pháp ngoại suy Tafel từ đường cong phân cực



(a) Sơ đồ mạch điện



(b) Hình ảnh các mẫu bê tông ở chế độ ngập hoàn toàn trong NBNT được áp dòng cưỡng bức

Hình 6. Phương pháp NT BUILD 356 hiệu chỉnh

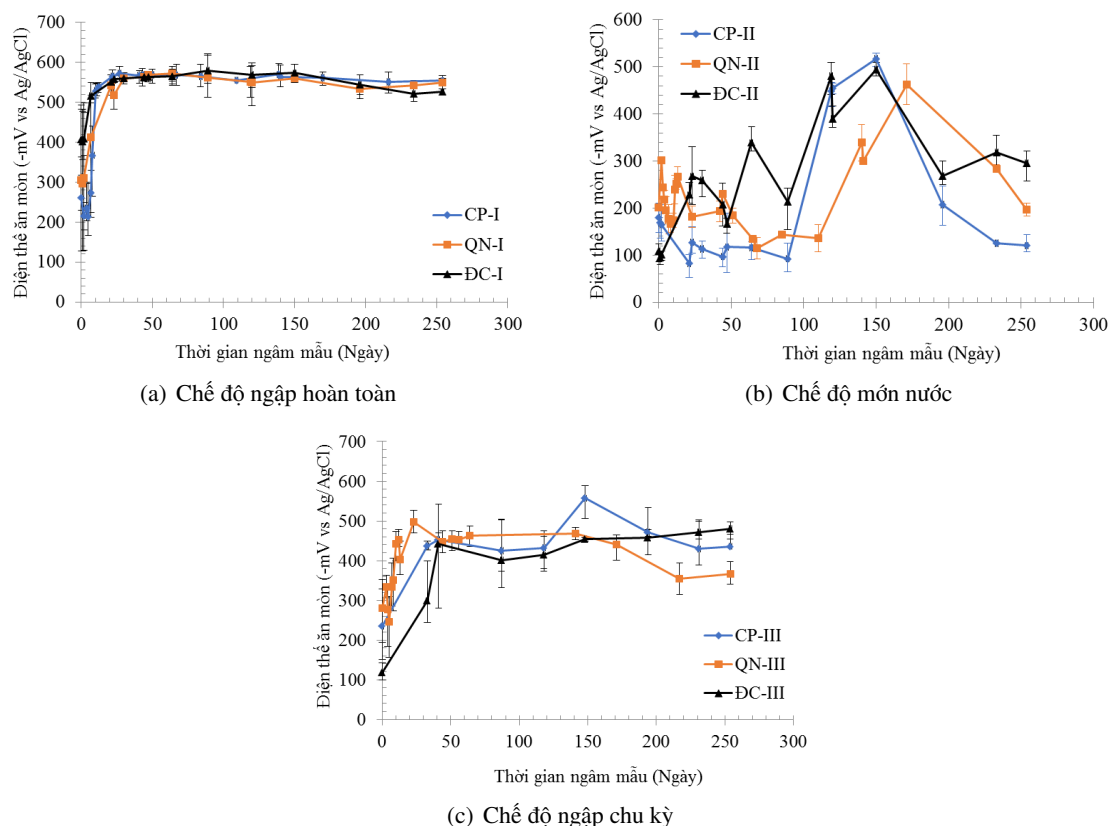
b. Phương pháp phi điện hóa

Các mẫu bê tông được đánh giá trực quan hàng ngày để nhận biết sự thay đổi bề mặt mẫu ở các điều kiện thử nghiệm tự nhiên và chế độ áp dòng. Các mẫu bê tông sau khi bị nứt được quan sát bằng mắt thường để đánh giá mức độ nứt của bê tông trước khi phá hủy. Cốt thép trong bê tông được tách ra nhờ dùng lực máy nén tác động lên vết nứt trên bê tông. Phần bề mặt bên trong bê tông và cốt thép được quan sát, nhận xét về màu sắc và độ gỉ của cốt thép.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Ảnh hưởng của loại tro bay đến khả năng bảo vệ cốt thép trong bê tông

Hình 7 trình bày sự phụ thuộc của điện thế ăn mòn mạch hở của cốt thép trong bê tông theo thời gian ngâm với các chế độ ngâm mẫu khác nhau trong NBNT. Các giá trị thể hiện là giá trị trung bình của 03 mẫu đo và sai số so với giá trị trung bình.



Hình 7. Ảnh hưởng của loại tro bay và chế độ ngập nước đến điện thế ăn mòn cốt thép trong bê tông làm việc trong NBNT

Từ Hình 7 ta thấy điện thế ăn mòn cốt thép trong các mẫu bê tông đối chứng (ĐC) hay bê tông sử dụng tro bay (cả QN và CP) ở cả 3 chế độ ngập nước đều có xu hướng dịch chuyển về phía âm theo thời gian ngâm mẫu. Tuy nhiên, mức độ âm hơn và độ ổn định của điện thế ăn mòn khác nhau ở các loại bê tông khác nhau và chế độ ngập nước khác nhau.

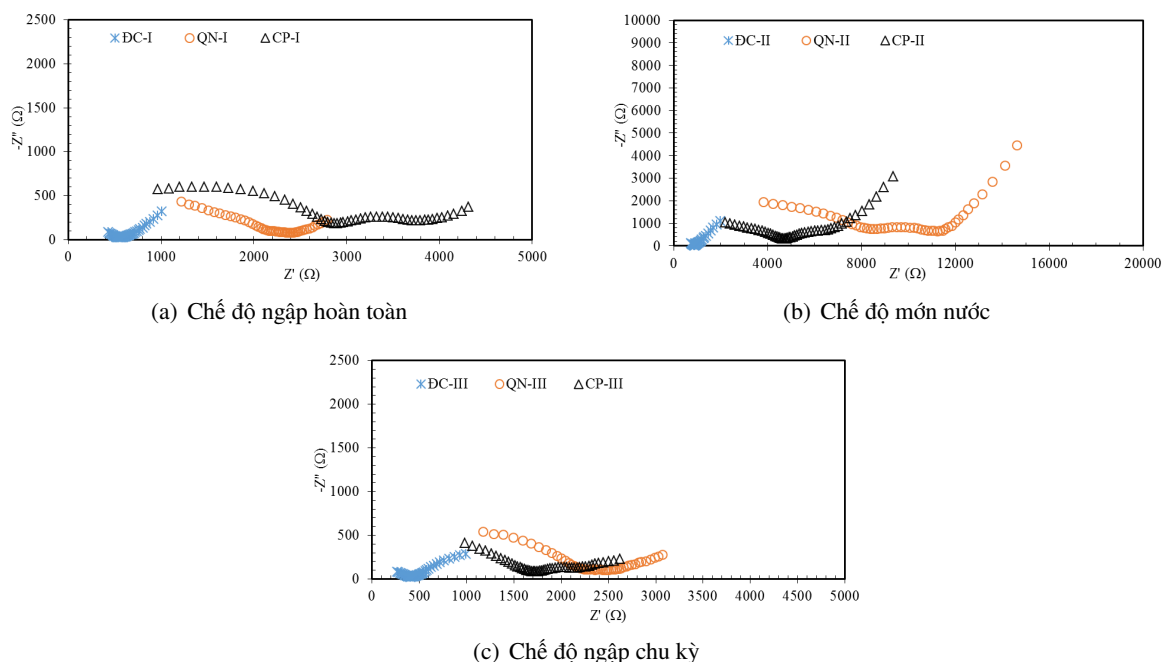
Với chế độ ngập hoàn toàn (Hình 7(a)), điện thế ăn mòn đều có xu hướng dịch chuyển về phía âm dần trong khoảng 10 ngày đầu thử nghiệm và ổn định trong khoảng -500 đến -600 mV so với điện cực bạc clorua (vs. Ag/AgCl) sau khoảng 12 ngày ngâm mẫu. Theo tiêu chuẩn TCVN 9348:2012 như Bảng 7 [28], xác suất khoảng 90% các mẫu cốt thép trong bê tông bị ăn mòn. Như vậy xét về mặt nhiệt động, nguy cơ ăn mòn ở mẫu bê tông QN, CP và bê tông không tro bay là như nhau và đều có xác suất bị ăn mòn cao ở chế độ ngập hoàn toàn sau khoảng 20 ngày thử nghiệm.

Với chế độ ngập mún nước (Hình 7(b)), điện thế ăn mòn có giá trị dương nhất trong 3 chế độ và khá ổn định trong khoảng 100 ngày ngâm mẫu. Trong thời gian đầu này, khả năng cốt thép bị ăn mòn không chắc chắn đối với hầu hết các mẫu. Một số mẫu bê tông QN và CP chỉ có xác suất bị ăn mòn khoảng 10%. Sau 120 ngày, điện thế ăn mòn đều có xu hướng dịch chuyển về phía âm hơn, tuy nhiên giá trị điện thế ăn mòn có giá trị dương nhất đối với mẫu bê tông QN, chứng tỏ khả năng ăn mòn mẫu bê tông QN vẫn thấp nhất.

Với chế độ ngập chu kỳ (Hình 7(c)), điện thế ăn mòn của cốt thép ở chu kỳ ướt có giá trị nằm trong dải rộng hơn từ -200 đến -600 mV vs. Ag/AgCl. Kết quả này cho thấy, khả năng xảy ra ăn mòn dao động từ 10 – 90% ở cả 3 loại bê tông. Tuy nhiên, các mẫu bê tông QN có nguy cơ gây ăn mòn cốt thép là thấp nhất.

3.2. Ảnh hưởng của loại tro bay đến mức độ ăn mòn tức thời của cốt thép trong bê tông

Phổ tổng trở điện hóa của các loại mẫu bê tông khác nhau sau 6 tháng làm việc trong môi trường NBNT ở chế độ ngập nước khác nhau được trình bày trên Hình 8.



Hình 8. Phổ tổng trở của cốt thép trong các mẫu bê tông sau 6 tháng ngập NBNT ở các chế độ khác nhau

Từ Hình 8 ta thấy, phổ tổng trở của mẫu cốt thép trong bê tông đều có 2 dạng như sơ đồ phổ Nyquist Hình 4. Các mẫu cốt thép trong bê tông DC đều có 2 cung như sơ đồ dạng phổ Hình 4(a), còn các mẫu cốt thép trong bê tông QN và CP hầu hết đều có 3 cung như sơ đồ Hình 4(b) [29, 30].

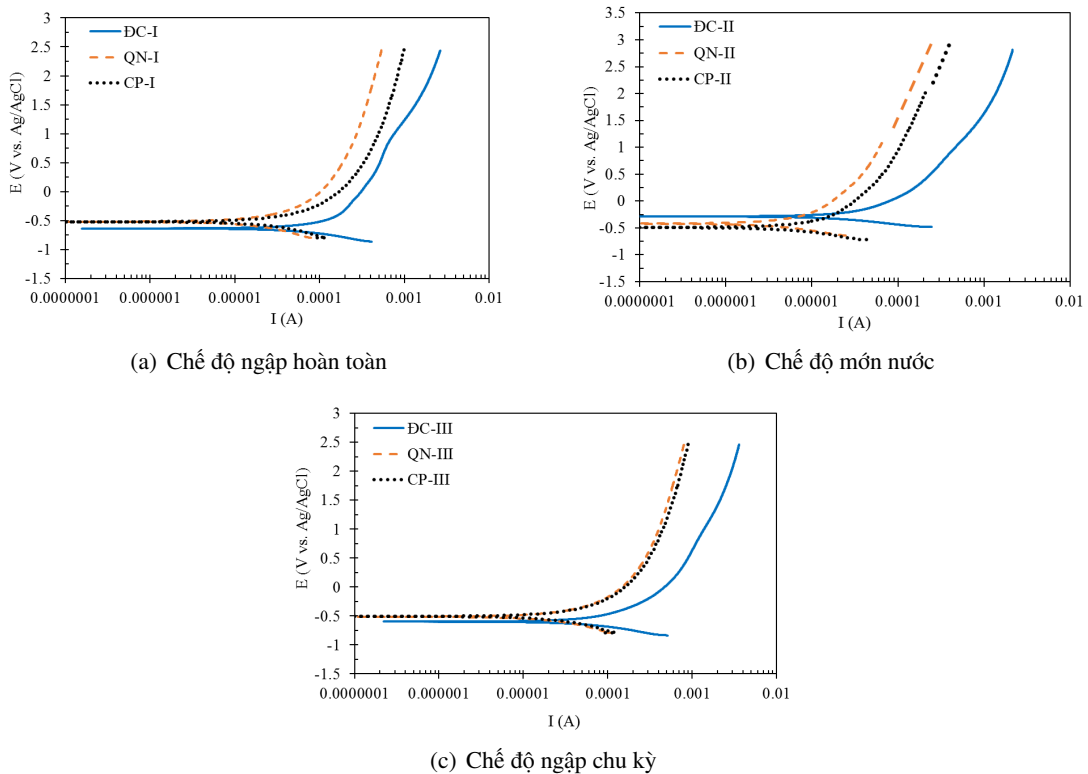
Điện trở của các mẫu bê tông làm việc ở chế độ ngập nước khác nhau được xác định và điện trở suất của bê tông (ρ) đã được tính toán theo công thức (1) [31]. Các kết quả được nêu ở Bảng 8.

Bảng 8. Điện trở và điện trở suất của các loại bê tông sau 6 tháng làm việc trong điều kiện ngập NBNT

Chế độ ngập NBNT	Điện trở của bê tông, R_c (k Ω)			Điện trở suất của bê tông, ρ (k Ω .cm)		
	ĐC	CP	QN	ĐC	CP	QN
Ngập hoàn toàn	0,6	3,0	2,1	2,4	11,8	8,2
Ngập mốn nước	0,9	4,8	8,6	3,5	18,8	33,8
Ngập chu kỳ	0,4	1,7	0,6	1,6	6,7	2,4

Từ Bảng 8 cho thấy, điện trở suất của các mẫu bê tông tro bay (QN và CP) đều lớn hơn nhiều so với các mẫu bê tông đối chứng ĐC. Đối chiếu với Bảng 7 có thể thấy, cốt thép trong các mẫu bê tông không tro bay ở tất cả các chế độ ngập nước đều có mức độ ăn mòn cao ($\rho < 10$ k Ω .cm). Trong khi đó, cốt thép trong các mẫu bê tông có tro bay hầu như chịu mức độ ăn mòn cao khi ngập chu kỳ. Ở chế độ mốn nước, cốt thép trong các mẫu bê tông tro bay đều có mức độ ăn mòn trung bình. Như vậy, ăn mòn cao nhất đối với cốt thép trong các mẫu bê tông ĐC và mức độ ăn mòn thấp nhất ở hầu hết các mẫu bê tông tro bay loại PC (mẫu QN).

Đường cong phân cực của cốt thép trong các loại bê tông sau 6 tháng làm việc với chế độ ngập nước khác nhau trong NBNT được trình bày trên Hình 9.



Hình 9. Đường cong phân cực của cốt thép trong các mẫu bê tông sau 6 tháng ngập trong NBNT

Từ Hình 9 cho thấy rằng loại tro bay cũng như chế độ ngập nước biển có ảnh hưởng không rõ rệt đến điện thế ăn mòn tức thời của cốt thép trong bê tông. Tuy nhiên, hầu hết ở cùng chế độ ngập nước, bê tông tro bay (mẫu QN và CP) đều có đường cong phân cực dịch chuyển về phía dòng nhỏ hơn tức là làm giảm dòng ăn mòn cốt thép trong bê tông. Bằng phương pháp ngoại suy Tafel từ đường cong phân cực, các thông số của quá trình ăn mòn cốt thép được xác định và so sánh với Bảng 7 như tài liệu [32], đánh giá về mức độ ăn mòn cốt thép trong bê tông như trong Bảng 9.

Bảng 9. Các thông số điện hóa của quá trình ăn mòn cốt thép trong bê tông

Chế độ ngập nước	Loại mẫu	E_c (-mV vs. Ag/AgCl)	i_c ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	P (mm/năm)	R_p (Ω)	Mức độ ăn mòn [32]
Ngập hoàn toàn	ĐC	637	2,3691	0,0275	1367,3	Cao
	CP	521	0,7029	0,0082	6077,5	Trung bình
	QN	471	0,2019	0,0023	21536,0	Thấp
Ngập mồn nước	ĐC	278	0,7219	0,0083	3378,1	Trung bình
	CP	491	0,2345	0,0027	13613,0	Thấp
	QN	420	0,1455	0,0017	21766,0	Thấp
Ngập chu kỳ	ĐC	598	2,8629	0,0333	1326,7	Cao
	CP	506	1,1320	0,0132	3874,7	Cao
	QN	513	0,9656	0,0112	4377,3	Trung bình - Cao

Trong đó, E_c , i_c , P và R_p lần lượt là điện thế ăn mòn, mật độ dòng ăn mòn, độ xâm nhập và điện trở phân cực của cốt thép trong bê tông.

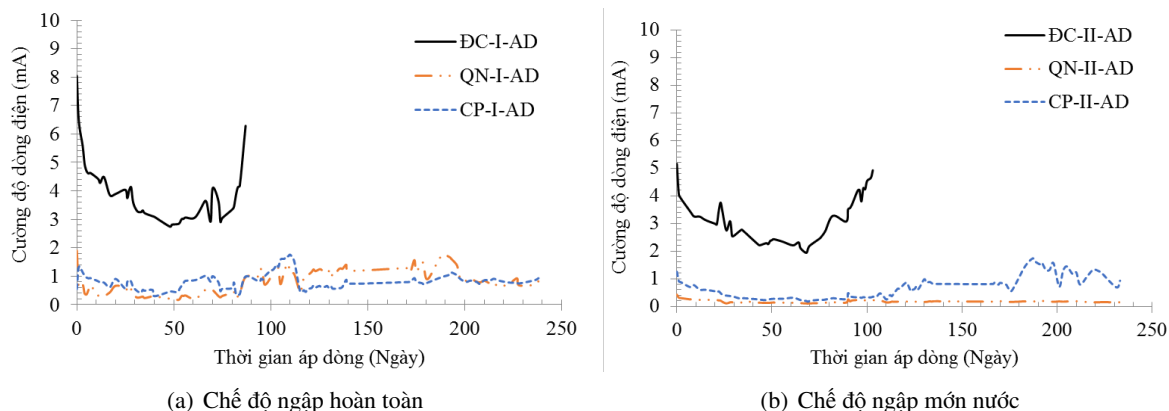
Bảng 9 cho thấy, ở tất cả các chế độ ngập nước, tốc độ ăn mòn cốt thép ở các mẫu bê tông ĐC không tro bay đều có giá trị lớn nhất và đều được đánh giá ăn mòn ở mức cao. Tốc độ ăn mòn cốt thép có giá trị nhỏ nhất ở các mẫu bê tông tro bay loại PC (mẫu QN) và chúng hầu hết đều bị ăn mòn ở mức độ thấp (trừ giai đoạn ướt ở chế độ ngập chu kỳ). Ở cùng một chế độ ngập nước, tốc độ ăn mòn cốt thép đều có cùng qui luật: ở bê tông ĐC > bê tông tro bay loại CFB (mẫu CP) > bê tông tro bay loại PC (mẫu QN).

Đối với cùng một loại mẫu bê tông làm việc ở chế độ ngập nước khác nhau, tốc độ ăn mòn cốt thép khác nhau. Tốc độ ăn mòn cốt thép có giá trị nhỏ nhất ở chế độ mồn nước và lớn nhất ở chế độ ngập chu kỳ 20h khô – 4h ướt. Tốc độ ăn mòn ở chế độ ngập chu kỳ lớn hơn ở chế độ ngập hoàn toàn. Điều này cho thấy, chế độ ngập chu kỳ đẩy nhanh quá trình ăn mòn thép trong bê tông bởi ở điều kiện này, các tác nhân gây ăn mòn cốt thép như độ ẩm, ion clorua, oxy hòa tan, ... luôn được tăng cường và đây được cho là điều kiện ăn mòn khắc nghiệt nhất đối với bê tông biển. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây về ăn mòn cốt thép trong bê tông biển [35].

Như vậy, việc thay thế tro bay cho xi măng làm giảm đáng kể tốc độ ăn mòn cốt thép trong bê tông ở tất cả các chế độ ngập nước khác nhau. Cụ thể, khi thay thế 50% tro bay loại CFB (mẫu CP) đã làm giảm tốc độ ăn mòn cốt thép xuống từ 2,6 đến 3,8 lần; và khi thay thế 50% tro bay loại PC (mẫu QN), tốc độ ăn mòn cốt thép giảm từ 3 đến 11,8 lần tùy vào điều kiện ngập nước. Điều đó chứng tỏ, việc sử dụng tro bay loại PC có hiệu quả hơn trong việc làm tăng độ bền ăn mòn của bê tông so với tro bay loại CFB với cùng hàm lượng. Điều này cũng phù hợp với kết quả nghiên cứu bằng phương pháp tổng trở điện hóa.

3.3. Ảnh hưởng của loại tro bay đến độ bền ăn mòn cốt thép trong bê tông khi áp dòng cưỡng bức

Theo tiêu chuẩn NT BUILD 356, hiệu điện thế trên hai đầu điện trở ($R = 10 \Omega$) được đo để đánh giá dòng điện chạy trong hệ. Kết quả sự phụ thuộc của cường độ dòng điện trung bình theo thời gian ở các mẫu bê tông ngập hoàn toàn và ngập mún nước được trình bày trên Hình 10.



Hình 10. Ảnh hưởng của loại tro bay đến cường độ dòng điện ăn mòn cốt thép trên hệ bê tông làm việc ở các chế độ ngập trong NBNT

Ở chế độ ngập hoàn toàn (Hình 10(a)), cường độ dòng điện trong mạch của các mẫu bê tông ĐC cùng tổ có giá trị ổn định theo thời gian trong khoảng 75 ngày (τ_1). Sau đó, các giá trị này có xu hướng tăng dần và các mẫu bê tông đều bị nứt sau trung bình khoảng 90 ngày áp dòng (τ_2). Điều đó chứng tỏ sau khoảng τ_1 , ion clorua đã thâm nhập vào bề mặt cốt thép của các mẫu bê tông không tro bay ngập hoàn toàn và mức độ ăn mòn tăng, sản phẩm ăn mòn hình thành nhiều, gây trương nở thể tích bê tông gây nứt bê tông ở thời điểm τ_2 . Trong khi đó, các mẫu bê tông có tro bay QN và CP đều vẫn đang duy trì ổn định sau khoảng 240 ngày thử nghiệm.

Ở chế độ ngập mún nước (Hình 10(b)), tương tự như với chế độ ngập hoàn toàn. Các mẫu bê tông ĐC đều bị nứt sau khoảng từ 100 đến 120 ngày áp dòng, trong khi các mẫu CP và QN vẫn chưa thấy dấu hiệu nứt. Các mẫu bê tông QN-II-AD vẫn có giá trị cường độ dòng điện duy trì ở mức ổn định trong khoảng 240 ngày áp dòng. Trong khi đó, các mẫu CP-II-AD ở thời gian áp dòng 110 ngày, dòng điện trong mạch đã bắt đầu tăng, và có giá trị khá cao trong khoảng thời gian từ 180 đến 200 ngày áp dòng, nhưng các mẫu đều chưa bị nứt. Qua kiểm tra ngoại quan cho thấy, lớp phủ epoxy trên cốt thép phía ngoài bê tông bị hỏng, gây ăn mòn phần thép nằm ngoài bê tông. Khi đó, bề mặt cốt thép được xử lý lại (phủ lại lớp epoxy mới) và kết quả cho thấy cường độ dòng điện chạy trong các mẫu này đã giảm trở về giá trị ổn định hơn. Sau khoảng thời gian gần 240 ngày áp dòng, chưa thấy dấu hiệu bê tông bị nứt ở cả 3 mẫu bê tông CP-II-AD. Như vậy, các mẫu bê tông QN và CP vẫn duy trì được khả năng bảo vệ cốt thép sau khoảng gần 240 ngày (8 tháng) áp dòng. Trong đó, mẫu bê tông sử dụng tro bay PC (QN) cho thấy khả năng bảo vệ tốt nhất trong các cấp phối nghiên cứu.

Điều đó cũng chứng tỏ, tro bay có tác dụng làm tăng độ bền ăn mòn của bê tông trong môi trường NBNT. Điều này là do tro bay có hoạt tính puzolan và kích thước hạt rất nhỏ gần bằng kích thước hạt xi măng nên khi sử dụng trong bê tông, tro bay vừa hoạt động như một vật liệu kết dính, vừa đóng vai trò điền đầy vào các lỗ rỗng mao quản làm cho bê tông trở nên đặc chắc hơn [8, 9, 11]. Tro bay PC có khả năng làm tăng độ bền ăn mòn của HSC cao hơn nhiều so với tro bay CFB. Điều này là do tro bay PC có tổng hàm lượng các oxit hoạt tính ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) cao hơn giá trị này của CFB

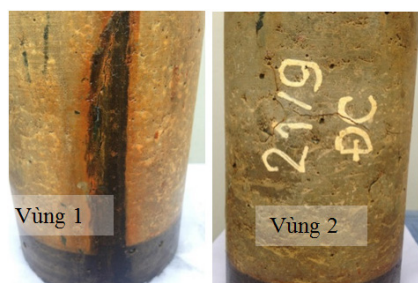
(Bảng 3). Hơn nữa hạt tro bay PC thường có dạng hình cầu, bề mặt trơn nhẵn nên lượng cần nước thấp hơn nhiều so với tro bay CFB, cho nên tỷ lệ N/X trong bê tông thấp hơn và cấu trúc bê tông sử dụng tro bay PC cũng đặc chắc hơn bê tông sử dụng tro bay CFB [9, 11].

Ngoài ra, khi so sánh cường độ dòng điện của cùng cấp phối khi làm việc ở hai chế độ ngập nước khác nhau (Hình 10) cho thấy, nhìn chung cường độ trong mạch ở các mẫu ngập môn nước ở cả ba cấp phối đều nhỏ hơn so với khi ở chế độ ngập hoàn toàn. Đồng thời mẫu ĐC-I-AP bị nứt sớm hơn (khoảng 10 đến 20 ngày) so với mẫu ĐC-II-AP. Điều này cũng chứng tỏ, chế độ ngập hoàn toàn có khả năng dẫn thấm các tác nhân ăn mòn cốt thép (ion Cl) cao hơn và là chế độ ăn mòn khắc nghiệt hơn so với chế độ ngập môn nước. Kết quả này cũng phù hợp với kết quả đo tổng trở điện hóa và đường cong phân cực ở trên [5, 35].

3.4. Hình thái bề mặt bê tông và cốt thép

Đối với chế độ thử nghiệm tự nhiên trong NBNT: Cả 3 loại mẫu bê tông ĐC, QN và CP đều chưa quan sát thấy dấu hiệu bất thường của bê tông sau 8 tháng thử nghiệm trong NBNT.

Đối với chế độ áp dòng cưỡng bức, sau khoảng 3-4 tháng áp dòng, tất cả tổ 3 mẫu ĐC ở cả chế độ ngập hoàn toàn và ngập môn nước đều bị nứt. Trong khi đó, các tổ mẫu bê tông CP và QN vẫn chưa có dấu hiệu nứt sau 8 tháng áp dòng. Các mẫu ĐC sau khi nứt được rửa sạch, để ráo và đem chụp ảnh vị trí vết nứt trên bê tông. Sau đó, cốt thép được tách ra nhờ dùng lực máy nén tác động lên vết nứt trên bê tông và quan sát bằng mắt vị trí cốt thép bị ăn mòn, màu sắc và lượng gỉ hình thành.



(a) Vị trí nứt trên bê tông



(b) 2 nửa bên trong bê tông và vùng cốt thép liên kết

Hình 11. Mẫu ĐC-I-AD ngập hoàn toàn bị nứt sau áp dòng



(a) Vị trí nứt trên bê tông



(b) 2 nửa bên trong bê tông và vùng cốt thép liên kết

Hình 12. Mẫu ĐC-II-AD ngập môn nước bị nứt sau áp dòng

So sánh Hình 11 và 12 cho thấy, vết nứt trên mẫu bê tông ĐC ngập hoàn toàn trong NBNT to hơn và bề mặt bê tông cho thấy xuất hiện nhiều sản phẩm ăn mòn cốt thép màu nâu đỏ hơn so với mẫu ĐC

ngập ở chế độ môn nước. Mẫu bê tông ĐC-I-AP xuất hiện hai vùng nứt khác nhau (vùng 1 và vùng 2 như trên Hình 11(a)). Mẫu bê tông ĐC-II-AP chỉ quan sát thấy một vết nứt như trên Hình 12(a). Quan sát cốt thép trong bê tông sau thử nghiệm cho thấy, mức độ ăn mòn cốt thép cao hơn, sản phẩm ăn mòn thép nhiều hơn trong khối bê tông ở chế độ ngập hoàn toàn. Điều này hoàn toàn phù hợp với những gì quan sát được trên bề mặt của mẫu bê tông.

Các cốt thép trong các mẫu bê tông ĐC sau khi nứt được tách ra và so sánh với mẫu cốt thép trước khi đúc, kết quả được đưa ra trên Hình 13. Nhận thấy, ở cả hai chế độ ngập hoàn toàn và ngập môn nước, cốt thép đều bị ăn mòn ở mức cao, đặc biệt ở các vằn trên thanh thép. Sản phẩm ăn mòn có màu xanh đen đến nâu đỏ và vàng. Mức độ ăn mòn ở chế độ ngập hoàn toàn lớn hơn so với ngập môn nước. Kết quả trực quan cũng hoàn toàn tương đồng với kết quả đo điện hóa trên đây.



Hình 13. So sánh ảnh cốt thép trong 2 mẫu bê tông ĐC bị nứt theo tiêu chuẩn NT BUILD 356 ở chế độ ngập hoàn toàn và ngập môn nước

4. Kết luận

Kết quả cho thấy, bê tông sử dụng hàm lượng tro bay lớn có khả năng chống ăn mòn cốt thép tốt hơn nhiều so với bê tông không tro bay khi làm việc trong môi trường biển. Trong đó, bê tông tro bay loại PC (của nhà máy nhiệt điện đốt than phun) bền ăn mòn hơn so với bê tông tro bay loại CFB (của nhà máy nhiệt điện đốt than tầng sôi tuần hoàn). Mức độ ăn mòn cốt thép trong bê tông phụ thuộc vào chế độ làm việc của bê tông và loại tro bay sử dụng:

- Với chế độ ngập nước, tốc độ ăn mòn cốt thép của bê tông không sử dụng tro bay là lớn nhất, gấp khoảng 3 lần so với các mẫu bê tông chứa 50% tro bay loại CFB và gấp khoảng từ 3 đến 11 lần (tùy chế độ ngập nước) so với bê tông sử dụng 50% tro bay loại PC.

- Tốc độ ăn mòn của cốt thép trong bê tông ở chế độ ngập chu kỳ gấp tới $1,2 \div 4,8$ lần so với ở chế độ ngập hoàn toàn, và gấp $3,9 \div 6,6$ lần so với ở chế độ ngập môn nước. Điều này chứng tỏ, thủy triều lên xuống là môi trường ăn mòn khắc nghiệt nhất đối với các kết cấu bê tông cốt thép. Mức độ ăn mòn cốt thép trong bê tông không tro bay và bê tông tro bay trong môi trường biển tuân theo thứ tự sau: vùng thủy triều lên xuống > vùng ngập hoàn toàn > vùng ngập môn nước.

- Kết quả đánh giá khả năng ăn mòn cốt thép trong bê tông khi áp dòng cưỡng bức theo tiêu chuẩn NT BUILD 356 cho thấy, các mẫu bê tông không sử dụng tro bay đã bị nứt hoàn toàn sau khoảng 90-120 ngày (3 - 4 tháng), trong khi các mẫu bê tông CP và QN vẫn đang có giá trị dòng ổn định, chưa bị nứt sau khoảng 240 ngày (8 tháng) áp dòng.

Lời cảm ơn

Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Trường Đại học Xây dựng Hà Nội cho đề tài “Nghiên cứu đánh giá độ bền ăn mòn của bê tông chất lượng cao sử dụng hàm lượng tro bay lớn trong môi trường biển”, mã số 41-2021/KHXD; Bộ xây dựng cho đề tài nghiên cứu và phát triển ứng dụng

bê tông cường độ cao sử dụng hàm lượng tro bay lớn trong các kết cấu công trình ven biển và hải đảo”, mã số: RD 25-20.

Tài liệu tham khảo

- [1] Tiến, C. D., Khoan, P. V., Hùng, L. Q. (2003). *Báo cáo tổng kết dự án: Chống ăn mòn và bảo vệ các công trình bê tông và bê tông cốt thép vùng biển*. Đề tài cấp Bộ, Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng.
- [2] Hạnh, Đ. K., Hiền, D. T. T. (2011). Tình trạng ăn mòn bê tông cốt thép và giải pháp chống ăn mòn cho công trình bê tông cốt thép trong môi trường biển Việt Nam. *Tạp chí và tuyển tập số đặc biệt 201100007, Đại học Thủy lợi*.
- [3] Tân, N. N., Dũng, T. A., Thế, N. C., Tuấn, T. B., Anh, L. T. (2018). [Nghiên cứu thực nghiệm xác định ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép đến ứng suất bám dính giữa bê tông và cốt thép](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 12(6):29–38.
- [4] Thomas, M. D. A., Moffatt, E. G. (2018). The Performance of Concrete in a Marine Environment. *Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures, Paper Number PL01*.
- [5] Montemor, M. F., Simões, A. M. P., Salta, M. M. (2000). [Effect of fly ash on concrete reinforcement corrosion studied by EIS](#). *Cement & Concrete Composites*, 22(3):175–185.
- [6] Malhotra, V. M., M.-H., Z., Read, P. H., Ryell, J. (2000). [Long-Term Mechanical Properties and Durability Characteristics of High-Strength/High-Performance Concrete Incorporating Supplementary Cementing Materials under Outdoor Exposure Conditions](#). *ACI Materials Journal*, 97(5):518–525.
- [7] Maslehuddin, M., Saricimen, H., Al-Mana, A. I. (1987). Effect of Fly Ash Addition on the Corrosion Resisting Characteristics of Concrete. *ACI Materials Journal*.
- [8] Saraswathy, V., Muralidharan, S., Thangavel, K., Srinivasan, S. (2003). [Influence of activated fly ash on corrosion-resistance and strength of concrete](#). *Cement & Concrete Composites*, 25(7):673–680.
- [9] Chalee, W., Ausapanit, P., Jaturapitakkul, C. (2010). [Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis](#). *Materials and Design*, 31(3):1242–1249.
- [10] Thomas, M. (2007). *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete*. Portland Cement Association.
- [11] Kate, G. K., Murnal, P. B. (2013). Effect of addition of fly ash on shrinkage characteristics in high strength concrete. *International Journal of Advanced Technology in Civil Engineering*, 2(1):11–16.
- [12] Kiên, T., Thành, L., Lanh, P. (2013). Sustainability in the concrete industry for construction of mega cities. *Proceeding of International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia (USMCA2013)*, Hanoi, Vietnam.
- [13] Pham, H. H., Tong, K. T., Le, T. T. (2011). High strength concrete using fly ash for the structures in Vietnamese marine environment for sustainability. *Proceeding of the international council Hanoi 2011-Innovation and sustainable construction in developing countries (CIB W107)*, 173–177.
- [14] Titarmare, A. P., Deotale, S. R. S., Bachale, S. B. (2012). Experimental Study Report on Use of Fly Ash in Ready Mixed Concrete. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 3:2–10.
- [15] Nam, V. H. (2016). *Nghiên cứu sử dụng tro tuyển Phả Lại hàm lượng cao trong bê tông khối lớn thông thường dùng cho đập trọng lực*. Luận án Tiến sỹ kỹ thuật, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.
- [16] ACI 232.2R-96 (1996). *Use of fly ash in concrete*. American Concrete Institute, Detroit.
- [17] Nguyen, C. V., Lambert, P., Tran, Q. H. (2019). [Effect of Vietnamese Fly Ash on Selected Physical Properties, Durability and Probability of Corrosion of Steel in Concrete](#). *Materials*, 12(4):593.
- [18] TCVN 4030:2003. *Phương pháp xác định độ mịn đối với xi măng*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [19] TCVN 6017:2015 (ISO 9597:2008). *Xi măng - Phương pháp xác định thời gian đông kết và độ ổn định thể tích*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [20] TCVN 6016:2011. *Xi măng - Phương pháp thử - Xác định cường độ*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [21] TCVN 7572:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [22] TCVN 7570:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [23] TCVN 10302:2014. *Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.

- [24] ASTM C618-19 (2019). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [25] TCVN 3106:1993. *Hỗn hợp bê tông nặng - Phương pháp thử độ sụt*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [26] TCVN 3118:1993. *Bê tông nặng- Phương pháp xác định định cường độ nén*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [27] ASTM D1141-98 (2021). *Standard Practice for Preparation of Substitute Ocean Water*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [28] TCVN 9348:2012. *Bê tông cốt thép - Kiểm tra khả năng cốt thép bị ăn mòn - phương pháp điện thế*. Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam.
- [29] Ribeiro, D. V., Souza, C. A. C., Abrantes, J. C. C. (2015). [Use of Electrochemical Impedance Spectroscopy \(EIS\) to monitoring the corrosion of reinforced concrete](#). *BRACON Structures and Materials Journal*, 8(4):529–546.
- [30] Sohail, M. G., Kahraman, R., Alnuaimi, N. A., Gencturk, B., Alnahhal, W., Dawood, M., Belarbi, A. (2020). [Electrochemical behavior of mild and corrosion resistant concrete reinforcing steels](#). *Construction and Building Materials*, 232:117205.
- [31] Layssi, H., Ghods, P., Alizadeh, A. R., Salehi, M. (2015). [Electrical Resistivity of Concrete: Concepts, applications, and measurement techniques](#).
- [32] Andrade, C., Alonso, C. (2004). [Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method](#). *Materials and Structures*, 37(9): 623–643.
- [33] NT BUILD 356. *Concrete repairing materials and protective coating: Embedded steel method, chloride permeability*. Published by NORDTEST Tekniikantie 12, FIN-02150 Espoo, FINLAND. UDC 691.32:658.588.
- [34] Tân, N. N. (2020). Nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của cường độ bê tông đến khả năng hạn chế ăn mòn cốt thép trong môi trường clorua. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*.
- [35] Kao, Y.-C., Ueda, T., Chiu, C.-K. (2017). [Evaluation of Steel Corrosion in Fly Ash Concrete Containing Chlorides Using Electrochemical Indexes](#). *Journal of Society of Materials Science, Japan*, 66(8):566–573.